

# Modélisation intégrée des écoulements et du transfert des nitrates sur le bassin de la Seine.

**Eric Gomez** (CIG, Ecole des Mines de Paris)

**Emmanuel Ledoux** (CIG, Ecole des Mines de Paris)

L'objectif de l'étude est de se doter d'un outil de modélisation capable de simuler, dans un premier temps, les débits dans les cours d'eau et les écoulements souterrains sur le bassin de la Seine, puis dans un second temps, les transferts de nitrates dans le système hydrologique, depuis les zones d'épandage jusqu'aux exutoires, en passant par les différents réservoirs souterrains. Pour ce faire, nous disposons du modèle hydrologique MODCOU (simulation des écoulements), du modèle agronomique STICS (simulation des flux de nitrates à la base de la zone racinaire) et du modèle NEWSAM (simulation du transport de matière) destinés à être associés pour permettre la modélisation du transfert des nitrates au regard de l'évolution des pratiques agricoles sur le bassin de la Seine.

Cette note présentera essentiellement les résultats issus de la mise en œuvre de MODCOU.

## 1. Présentation du modèle couplé

Le modèle couplé permet de simuler conjointement les écoulements superficiels et souterrains sur un bassin hydrologique. Pour ce faire, on utilise la méthode des différences finies mises en œuvre sur des mailles carrées emboîtées de tailles variables.

Le cycle hydrologique est décomposé en étapes, considérées comme indépendantes, de manière à pouvoir contrôler séparément la validité des mécanismes internes (Ledoux, 1980 ; Ledoux *et al.*, 1984).

Le modèle est articulé en 4 parties principales concernant : l'élaboration de la structure, le bilan hydrique des précipitations, le transfert dans la zone non-saturée, les transferts conjoints superficiels et souterrains.

### 1.1 Elaboration de la structure du système hydrologique

#### *Discretisation spatiale*

La définition de la structure s'appuie sur la discrétisation du domaine en éléments auxquels sont rattachés les caractéristiques physiques aussi bien superficielles (direction de drainage, altitude minimale, zones de production) que souterraines (transmissivité, coefficient d'emmagasinement...) du milieu.

Le modèle distingue une couche superficielle, où s'effectue le partage entre le ruissellement et l'infiltration ainsi que le transfert superficiel, et une ou plusieurs couches profondes, éventuellement connectées hydrauliquement, sièges d'écoulements souterrains.

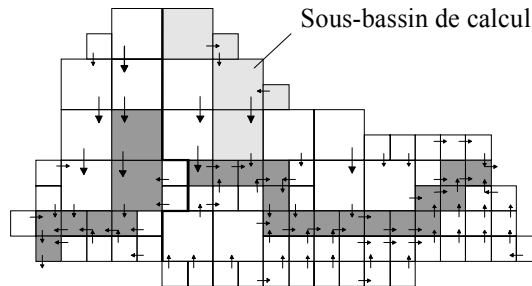
#### *Définition du réseau de drainage superficiel*

L'eau est transférée dans le réseau de drainage de surface qui revêt la forme d'une ou plusieurs arborescences, définies sans ambiguïté à partir des directions de drainage, unique pour chaque maille.

Pour alléger les calculs, le réseau de drainage (figure 1) est décomposé en :

- réseau hydrographique principal : les mailles appartenant au réseau hydrographique principal, au niveau desquelles ont lieu les échanges à double sens avec le domaine souterrain et où sont calculés les débits, sont appelées « mailles rivières ».
- zone de ruissellement pur : hors du réseau hydrographique principal, les mailles sont classées en 2 catégories :

- celles dont l'exutoire ne fait pas partie du réseau hydrographique principal. Elles forment alors un ou plusieurs bassins où le modèle se limite au calcul de l'infiltration en vue de l'alimentation des nappes sous-jacentes.
- celles qui sont drainées par une maille rivière du réseau hydrographique principal. Dans ce cas, elles constituent un « sous-bassin de calcul » sur lequel seront effectués les calculs d'infiltration et du ruissellement jusqu'à la rivière indépendamment des écoulements souterrains.



En grisé, les mailles rivières

**Figure 1.** Principe de discrétisation du domaine de surface

### ***Définition des caractéristiques physiographiques***

Les données physiographiques définies sur chaque maille de la surface concernent :

- l'altitude de la surface topographique, qui sert essentiellement au calcul des temps de transfert relatifs de l'eau de surface d'une maille jusqu'à l'exutoire (ttf), en sommant les temps de transfert (ttm) de 2 mailles consécutives le long du réseau de drainage.

$$ttm_{i \rightarrow j} = \frac{dl}{\sqrt{p}}$$

$$ttf_{(i)} = \sum_{i \rightarrow ex} ttm_{j \rightarrow k}$$

- la nature des sols présents sur chaque maille, exprimée en fraction de superficie occupée par chaque catégorie de sol ; la distinction en catégories reposant sur la manière dont doit être effectué le bilan hydrique.

### **1.2 Calcul du bilan hydrique**

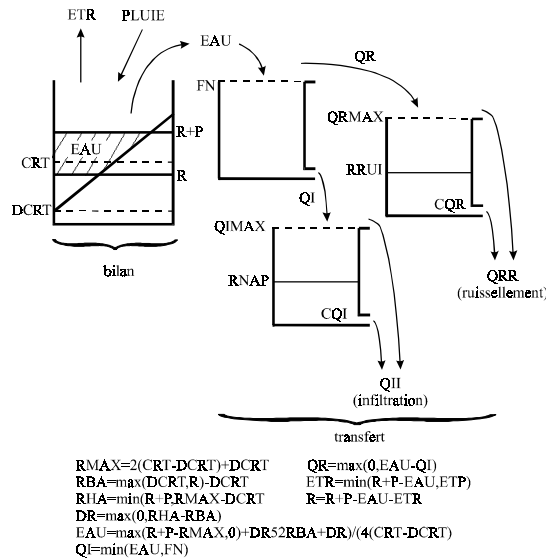
Le calcul du bilan hydrique utilise la fonction production qui répartit la lame d'eau disponible au sol entre le ruissellement, l'évaporation, l'infiltration et la quantité stockée dans le sol. Ce calcul est mené suivant le pas de temps des données météorologiques, pour chaque zone météo, et pour chaque catégorie de sol.

#### ***Les zones météorologiques***

Chaque maille est affectée à un poste pluviométrique définissant ainsi un certain nombre de zones météorologiques où les forçages (précipitations et ETP) sont considérés comme étant homogènes sur la zone.

#### ***Les fonctions productions***

Chaque fonction production correspond à une catégorie de sol et fait appel à un modèle à 9 paramètres, dont 2 d'initialisation, appartenant à la famille des modèles à réservoir (figure 2).



**Figure 2.** Schématisation d'une fonction de production

Le bilan hydrique est effectué, à chaque pas de temps, dans le réservoir de bilan, en fonction de la lame d'eau précipitée P, de l'évapo-transpiration potentielle ETP, et de l'état du stock en eau R du réservoir. Ainsi, la quantité EAU, disponible pour l'écoulement, est déterminée par 2 paramètres DCRT et CRT représentant les niveaux minimal et moyen du réservoir sol. Le premier réservoir de transfert répartit ensuite l'eau disponible en une lame ruisselée QR et une lame infiltrée QI en fonction d'un seuil d'infiltration FN. Les 2 autres réservoirs de transfert apportent éventuellement un retard aux quantités ruisselées et infiltrées avant de les introduire dans le système hydrologique.

### Transfert de l'eau de surface

Le programme ne réalise ici qu'un transfert partiel et provisoire de la seule eau ruisselée. Le transfert ne pourra être réglé définitivement que conjointement au transfert souterrain.

Les zones isochrones sont calculées, à partir des temps de transfert relatifs, en regroupant les mailles dont la durée du parcours à l'exutoire contient le même nombre entier de pas de temps météo. Le nombre de zones isochrones dépend donc du rapport entre le temps de concentration et le pas de temps météorologique.

Le transfert de la lame ruisselée  $Qr_i(t)$  arrivant au niveau de la maille i au pas de temps t est calculé d'après la formule :

$$Qr_i(t) = \sum_{k=0}^{K-1} \left( \sum_{j=1}^{N_k} qr_j(t - kdt) \right)$$

où K est le nombre de zones isochrones,  $N_k$  le nombre de mailles de la zone isochrone k, et  $qr_j(t - kdt)$  la lame ruisselée déduite du calcul du bilan hydrique au niveau de la maille j au temps t-kdt.

### 1.3 Transfert dans la zone non-saturée

Ce module est utilisé lorsque le calcul au niveau du bilan hydrique n'a pas permis d'induire un retard suffisant entre le débit d'infiltration, issu des fonctions productions, et le débit d'alimentation des nappes.

Le domaine modélisé est découpé en zones homogènes du point de vue des transferts dans la zone non saturée. A chacune de ces zones est associé un modèle à réservoirs en cascade de Nash à 2 paramètres : le nombre N de réservoirs reflétant l'épaisseur de la zone non saturée, représentée ainsi par N couches horizontales homogènes, et la constante de temps de vidange des réservoirs  $\tau$  caractérisant la vitesse de percolation verticale de l'eau (figure 3).

Le débit à l'instant  $t$  à la sortie du Nième réservoir résultant d'une recharge brusque d'amplitude  $\delta QI$  appliqué au premier réservoir à l'instant  $\tau$  ( $\tau < t$ ) s'exprime par la relation :

$$Q_N(t) = \frac{\delta QI(\tau)}{(N-1)!} \times e^{-(t-\tau)/\tau} \times \left( \frac{t-\tau}{\tau} \right)^{N-1}$$

Ces 2 paramètres sont ajustés par calage notamment au moyen des historiques piézométriques.

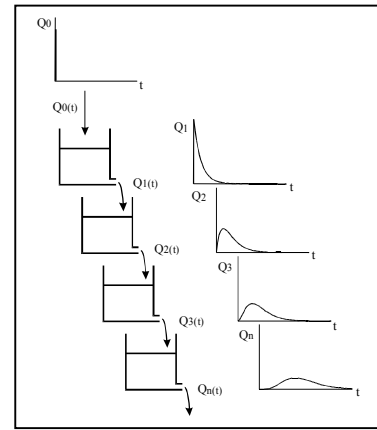


Figure 3. Principe du modèle de Nash

### 1.4 Transferts conjoints superficiels et souterrains

Ce dernier module simule le devenir de l'eau entre les 2 domaines en tenant compte de la relation nappes-rivières. Le résultat de la simulation concerne les variations du niveau piézométrique des nappes, ainsi que les débits aux exutoires et aux stations.

#### Le transfert souterrain

Ce transfert est basé sur l'intégration numérique de l'équation de diffusivité régissant les écoulements en milieu poreux. La schématisation multicouche adoptée distingue des niveaux perméables, sièges d'écoulements sub-horizontaux, séparés par des niveaux semi-perméables supposés non-capacitifs où les transferts sont monodimensionnels, subverticaux.

Au niveau de chaque couche, l'équation de la diffusivité s'écrit :

$$S \frac{\ddot{a} h}{\ddot{a} t} + q + q_{sup} + q_{inf} = \text{div} (T \cdot \text{grad}(h))$$

où  $h$  : charge hydraulique

$T$  : tenseur de transmissivité

$S$  : coefficient d'emmagasinement

$q$  : débit injecté ou prélevé par unité de surface

$q_{sup}$  et  $q_{inf}$  : débits échangés à travers les semi-perméables supérieurs et inférieurs

A chaque pas de temps, la résolution de cette équation, par la méthode des différences finies, fournit la charge hydraulique en tout point du domaine souterrain.

#### Le transfert dans le réseau hydrographique principal

L'eau produite par ruissellement, à l'exutoire des sous-bassins de calcul, est acheminée par le réseau hydrographique qui est découpé, suivant les zones isochrones, en biefs, en tenant compte des relations nappe-rivière. Chaque bief a un coefficient de vidange  $xkb$ . Le volume sortant d'un bief est égal à  $xkb \cdot V$  (volume en eau du bief).

Le volume écoulé à l'aval d'une succession de biefs se déduit de la formule :

$$V_a(t+dt) = (1 - xkb_a) \cdot (V_a(t) + Qr_a(t) + Qnap_a(t)) + \sum_{j=1}^{j=N} xkb_j \cdot (V_j(t) + Qr_j(t) + Qnap_j(t))$$

C'est-à-dire (volume du bief a après vidange) + (somme des vidanges des N biefs situés en amont de a).  
où :

$V_i(t)$  : volume d'eau contenu dans le bief  $i$  au temps  $t$ ,  
 $Q_{rj}(t)$  : lame ruisselée parvenant au bief  $j$  entre  $t$  et  $t+dt$

$$Q_{rj}(t) = \sum_{i=1}^{i=n} q_{ri}(t)$$

Somme des lames ruisselées parvenant aux  $n$  mailles rivières constituant le bief.

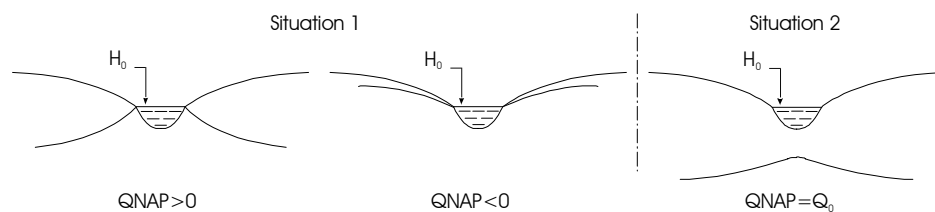
$Q_{napj}(t)$  est le volume échangé avec le domaine souterrain au niveau du bief  $j$  entre  $t$  et  $t+dt$

$$Q_{napj}(t) = \sum_{i=1}^{i=n} q_{nap_i}(t)$$

Somme des volumes échangés au niveau de  $n$  mailles rivières constituant le bief.

### La relation nappe-rivière

A chaque pas de temps la piézométrie évolue ainsi que les échanges nappes-rivières. Selon l'état hydraulique du système, 2 situations sont possibles (figure 4).



**Figure 4.** Schématisation de la relation nappe-rivière

- Situation 1 : la rivière et la nappe sont connectées hydrauliquement, la rivière imposant son niveau à la nappe moyennant une certaine perte de charge à travers son lit. Le sens de circulation peut éventuellement varier dans le temps. Le débit échangé se calcule par :  
 $Q_{nap} = TP * (H_0 - H)$   
 Avec  $H$  : charge de la nappe,  $H_0$  : niveau de la rivière, et  $TP$  : coefficient de transfert réglant la perte de charge entre nappe et rivière qui est fonction de la perméabilité du lit.
- Situation 2 : la rivière et la nappe sont déconnectés. La rivière alimente la nappe avec une valeur de débit limite infiltrable  $Q_0$  :  
 $Q_0 = Q_{nap}$

## 2. Modélisation du système hydrologique Seine

### 2.1 Domaine de surface

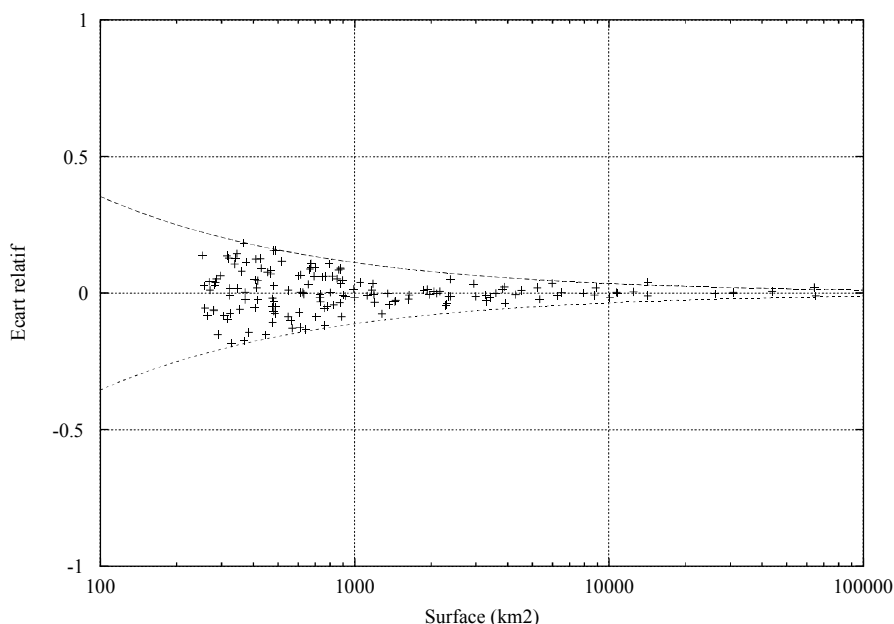
#### Discrétisation et banque de drainage

Le M.N.T. dont nous disposons couvre la zone 335-981WE et 2115-2666SN en coordonnées Lambert 2 étendu au pas de 1 km. Le logiciel Hydrodem (Leblois, 1993), utilisé sous le SIG Idrisi, a permis d'établir différentes couches d'informations (directions de drainage, réseau hydrographique, limites de sous-bassins...), à partir de ce M.N.T., pour permettre la construction du maillage. Le domaine modélisé atteint les limites hydrauliques du système figurées par les cours d'eau des bassins adjacents (la Somme, la Meuse, la Loire, le Loir et le Touques). Entre ces cours d'eau, le modèle s'appuie sur les limites à flux nuls constituant le bassin hydrologique de la Seine.

La surface du domaine ainsi décrit représente 95560 km<sup>2</sup> et a été discrétisé en 35698 mailles de 1 à 8 km de côté dont 6481 mailles rivières. Le maillage retenu permet de garder les limites des

sous-bassins d'une superficie supérieure à 250 km<sup>2</sup>, ainsi qu'une résolution fine au niveau du réseau hydrographique afin de décrire correctement les relations nappes-rivières.

Afin de s'assurer de la qualité du modèle de drainage, les surfaces drainées au niveau des stations hydrométriques de la banque HYDRO (Shydro) sont comparées aux surfaces calculées (Scalc). Le critère utilisé tient compte des surfaces mises en jeu en comparant l'écart relatif (Scalc – Shydro) à l'erreur relative autorisée (E) qui correspond au produit de la surface d'un pixel du M.N.T. par le périmètre d'un disque de surface équivalente à Shydro (figure 5). Ainsi, parmi les 158 stations retenues drainant une surface de 250 km<sup>2</sup> au minimum, seules 2 stations dépassent l'erreur autorisée de 1%.



**Figure 5.** Erreurs de reconstitution sur les surfaces drainées

### **Fonctions productions**

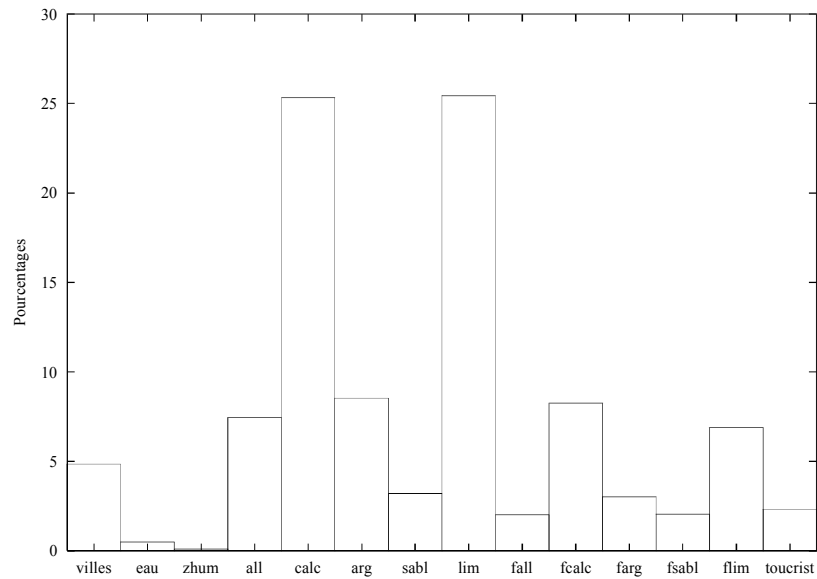
Pour différencier les fonctions productions, nous avons exploité la base de données des sols de France à l'échelle 1/1000000 de l'INRA, et la base de données géographique d'occupation du sol Corine Land Cover, dont les polygones, de surfaces initiales 25 ha, ont été agrégés à 1 km<sup>2</sup>.

L'analyse de ces bases de données a permis de distinguer 6 catégories de sols, et 5 types d'occupation des sols (tableau 1).

**Tableau 1.** Définition des catégories de sols, et des types d'occupation des sols

<b>B.D. Corine Land Cover</b>	<b>B.D. INRA</b>
- Territoires artificialisés (villes)	- Dépôts alluviaux ou glaciaires (all)
- Forêts (f)	- Roches carbonatées (calc)
- Hors-forêts (cultures, végétation arbustive ou herbacée, pas ou peu de végétation)	- Matériaux argileux et marnes (arg)
- Zones humides (zhum)	- Roches sableuses, formations détritiques (sabl)
- Surfaces en eau (eau)	- Roches limoneuses (lim)
	- Roches cristallines et migmatites (cris)

Le croisement de ces 2 cartes conduit à distinguer 14 fonctions productions, distribuées sur le maillage de base, dont la répartition est présentée sur la figure 6.



**Figure 6.** Répartition des zones de production sur le bassin de la Seine

### **Zones météorologiques**

Les forçages atmosphériques utilisés par le modèle couplé et STICS sont les précipitations, l'ETP, la Température minimum et maximum, et le Rayonnement global. Ces variables sont fournies par Météo France au pas de temps journalier, sous la forme de champs interpolés, sur une grille d'un pas de 8 km.

Ces données sont le résultat de la mise en œuvre de SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige) dont le but initial est de fournir au pas de temps horaire, avec une discrétisation verticale : température de l'air à la surface, vent, humidité de l'air, nébulosité, pression, précipitations liquides et solides, rayonnement atmosphérique et rayonnement solaire incident (direct et diffus). SAFRAN utilise une méthode d'interpolation qui prend en compte les sorties d'un modèle à méso-échelle (20 à 100 km<sup>2</sup>) et les observations disponibles. Ici les observations proviennent des données relevées en 62 postes synoptiques et 1569 postes du réseau climatique d'Etat.

### **Mesures hydrométriques**

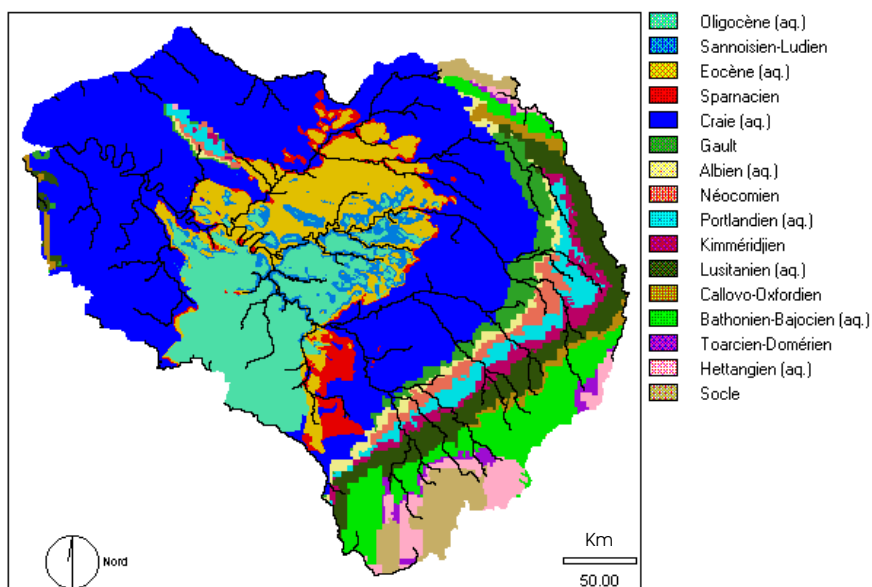
Les 158 stations hydrométriques retenues drainent une surface supérieure à 250 km<sup>2</sup> sur le bassin et serviront à effectuer le calage du modèle. Les chroniques de débits journaliers dont nous disposons ont été extraites de la base de données HYDRO.

## **2.2 Domaine souterrain**

### **Description et choix des aquifères**

Le Bassin de Paris est constitué par un ensemble de terrains sédimentaires reposant sur un socle anté-permien et limité par les massifs hercyniens affleurants. Les couches les plus récentes se situent au centre du bassin, tandis que les plus anciennes occupent la périphérie. Plusieurs ensembles hydrogéologiques principaux sont présents sur la zone d'étude (Wei, 1990; Certes et al. 1997; Mégnién, 1970) : les nappes de l'Oligocène, de l'Eocène, de la Craie, de l'Albien, du Néocomien, du Portlandien, du Lusitanien, du Dogger, et du Lias (figure 7).

Les aquifères qui affleurent, à l'est du bassin, ne seront pas représentés dans le modèle, mais les écoulements seront retardés, dans cette zone, grâce au calage des paramètres des fonctions de productions.



**Figure 7.** Carte hydrogéologique simplifiée

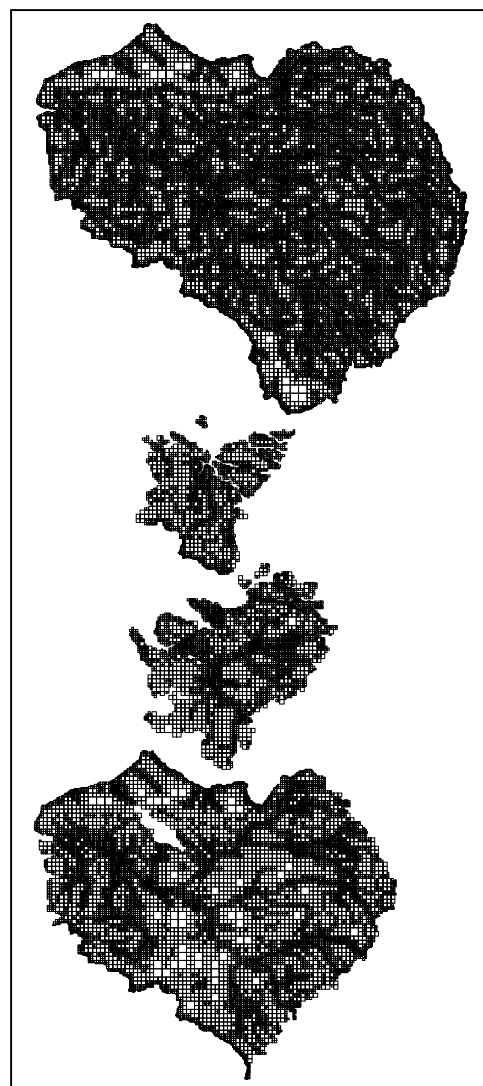
On s'attachera à simuler les écoulements souterrains, en adoptant une structure multicouche, au niveau de la Craie et des terrains tertiaires.

Le choix des aquifères modélisés est donc le suivant :

- aquifère de l'Oligocène (calcaires de Brie, sables stampien, calcaires de Beauce)
- aquifère de l'Eocène (nappe de Soissonnais, nappe des calcaires de Champigny)
- aquifère de la Craie (Crétacé supérieur)

### **Maillage**

Le programme SIGMOD (Golaz, 1995) permet le maillage automatique de la couche de surface. Pour les besoins de l'étude, ce programme a été développé afin de permettre le maillage des couches souterraines. Le but est de réduire au maximum le nombre de mailles des couches souterraines en regroupant les mailles de la couche de surface suivant des critères topologiques et hydrologiques (tableau 2). Ainsi, au niveau de la partie affleurante d'un aquifère, les mailles correspondant aux mailles rivières sus-jacentes ne sont pas regroupées, de manière à garder une résolution fine au niveau du maillage, pour représenter correctement les échanges nappes-rivières. En revanche, dans la partie captive et hors des mailles rivières, les mailles de la couche sus-jacente sont regroupées de manière à obtenir un réseau de mailles carrées emboîtées de tailles variables, tout en respectant les critères topologiques en 3 dimensions, pour permettre les échanges éventuels entre les nappes (figure 8).



**Figure 8.** Maillage des différentes couches



**Tableau 2.** *Discretisation des couches souterraines*

<b>Aquifère</b>	<b>Surface (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Nombre de mailles</b>
Oligocène	9912	2377
Eocène	18928	5049
Craie	65468	14806

### **Mesures piézométriques**

Les chroniques piézométriques sont issues de la base de données de l'Agence de l'Eau Seine Normandie et serviront à caler la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement des nappes modélisées. On dispose d'environ 200 piézomètres sur le domaine modélisé.

### **2.3 Echanges nappes-rivières**

La faible résolution du M.N.T. (1 km) ne permet pas de représenter correctement les côtes de drainage des nappes (cotes des surfaces libres des rivières). Elles ont donc été saisies à partir des cartes IGN aux échelles 1/100000 et 1/25000, des guides de la navigation, et des côtes annoncées par la banque HYDRO au niveau des stations. Les données saisies ont ensuite été interpolées linéairement et en tenant compte de la topographie imposée par le M.N.T.

## **3. Mise en œuvre du modèle couplé**

### **3.1 Ajustement du modèle de surface**

#### **Calage des temps de concentration**

Le calcul des temps de transfert d'une maille à l'exutoire est effectué en multipliant le temps de concentration par la distribution des temps de transfert normalisés sur le bassin.

La formule du temps de transit entre 2 mailles a été modifiée de manière à tenir compte des surfaces drainées par les mailles.

Formule de base : 
$$t_{(ij)} = \frac{dl}{\sqrt{p}}$$

Formule modifiée : 
$$t_{(ij)} = \frac{dl}{(\sqrt{p})S^\alpha}$$

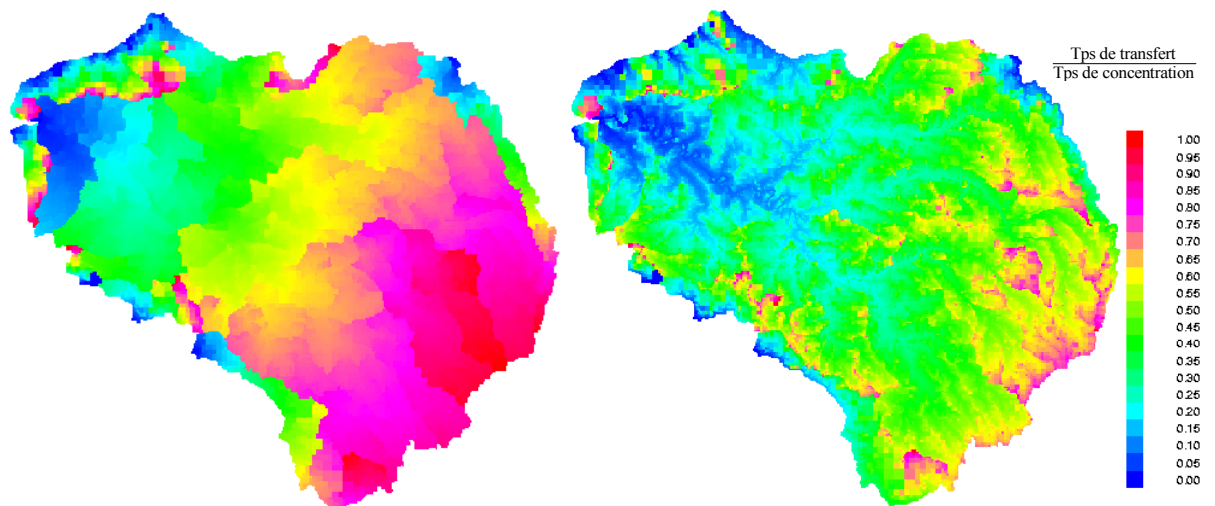
où :

dl : pas d'espace du M.N.T.

p : valeur absolue de la pente entre la maille courante et sa maille aval (lorsque la pente est nulle, elle est remplacée par une valeur minimale).

S : surface drainée

La figure 9 montre la répartition des zones isochrones sur le bassin avec la formule de base (à gauche), et avec la formule modifiée en prenant  $\alpha=0.4$  (à droite). La formule modifiée du calcul du temps de transit permet, dans une certaine mesure, de différencier les transferts en rivière des transferts sur les versants. La carte de droite est utilisée, par la suite, pour le calage du temps de concentration sur le bassin de la Seine. La démarche consiste à obtenir un synchronisme des pointes de crues entre les débits observés et les débits issues d'une simulation simple ( $fn=0$ ,  $cqr=1$ ) le long de la Seine. Le temps de concentration est ainsi évalué à 25 jours.

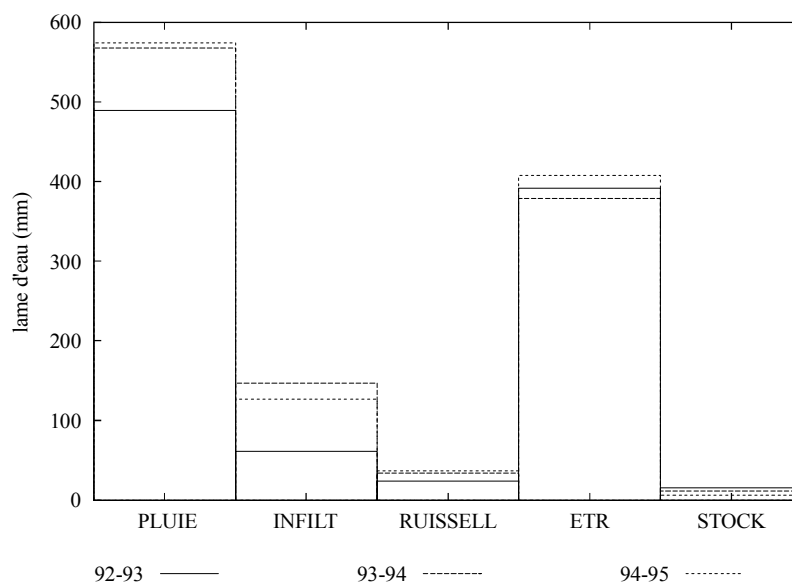


**Figure 9.** Répartition des zones isochrones

### ***Calage des paramètres des fonctions production***

Dans un premier temps, nous avons identifié un certain nombre de stations où dominaient clairement 2 ou 3 fonctions de production. Ensuite, les paramètres DCRT et CRT du réservoir de bilan, qui règlent l'évapotranspiration calculée, ont été calés de manière à assurer, pour chaque station hydrométrique, des quantités d'eau écoulées en accord avec les volumes mesurés. Le paramètre FN, qui représente l'infiltration maximale sur un pas de temps, assure la répartition entre le ruissellement et l'infiltration. Ces paramètres sont bien entendu liés à la nature des sols. Ainsi, considère-t-on qu'un couple sol-végétation répond de la même façon à un épisode pluvieux. Cette hypothèse est forte mais minimise le nombre de paramètres à caler.

Le bilan hydrique s'établit comme suit sur le bassin pour la période 1992-1995 (figure 10).

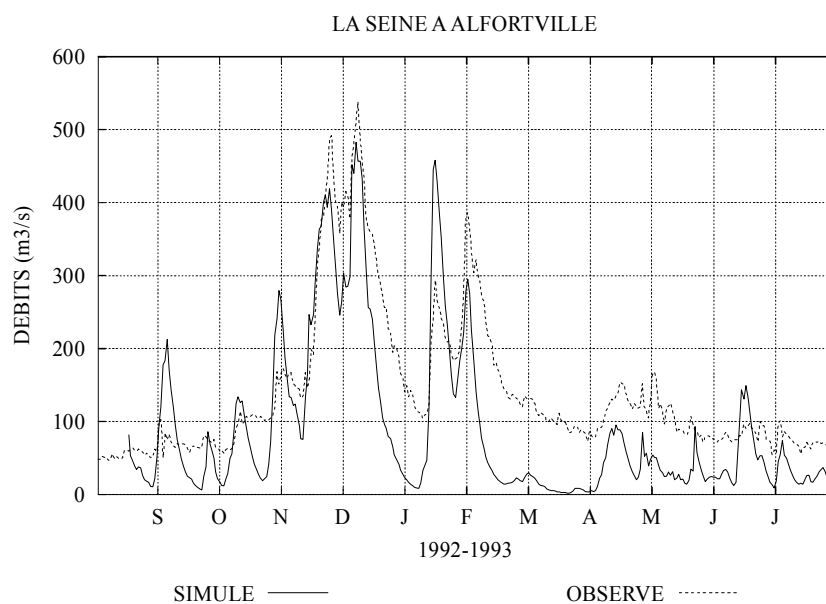


**Figure 10.** Bilans hydrologiques de 1992 à 1995

La figure 11 présente un résultat de simulation du transfert des lames ruisselées uniquement, c'est-à-dire sans tenir compte du transfert dans le domaine souterrain. Le calage des paramètres du réservoir superficiel (CQR et QRMAX) règle l'étalement des crues de ruissellement, en ajustant l'intensité du maximum et l'aspect du tarissement de l'écoulement retardé. Ce calage offre une première garantie de la représentativité finale du modèle couplé.

Cet ajustement doit cependant être considéré comme provisoire. Seule une simulation complète, prenant en compte le ruissellement et le débit de base, ainsi que les variations piézométriques, pourra confirmer les hypothèses faites.

Il conviendra donc, par la suite, d'intégrer la composante souterraine dans les transferts en rivières par le biais des échanges nappes-rivières, et d'améliorer en retour le calage des fonctions productions.



**Figure 11.** Simulation des débits à Alfortville (lame ruisselée)

#### 4. Conclusions et perspectives

La base de données est établie sur le bassin. Des données concernant la gestion des barrages-réservoirs, ainsi que des données relatives à la qualité des eaux souterraines, viendront compléter cette base.

Le calage des fonctions production donne un bilan hydrique en accord avec le bilan hydrique observé. L'étape suivante consistera à caler les transferts dans le domaine souterrain, et à tenir compte de la composante souterraine dans le calcul du transfert en rivières.

Enfin, l'association entre STICS et MODCOU/NEWSAM sera réalisée en assurant le routage des nitrates issus du calcul de STICS à travers la zone non-saturée jusqu'à la nappe où ils seront utilisés comme données d'entrée du modèle NEWSAM.

**REMERCIEMENTS :** Nous remercions les différentes équipes pour les informations fournies : D. King et O. Duval pour la base de données des types de sols de l'INRA, J. Noilhan et P. Lemoigne (Météo France) pour les données météo, F. Hanot et D. Lafarge (CGG) pour la structure du domaine souterrain, Y. Eraud et J.F. Vernoux (AESN) pour les données hydrométriques et piézométriques.

## 5. Références

- Certes C., Escalier des Orres P., Goblet P., Levassor A., Marivoet J. (1997). Evaluation of elements responsible for the effective engaged dose rates associated with the final storage of radioactive waste : Everest project. *European Commission*.
- Golaz-Cavazzi C. (1995). Exploitation d'un modèle numérique de terrain pour l'aide à la mise en place d'un modèle hydrologique distribué. *DEA UPMC*, 71p.
- Leblois E. (1993). De l'hydrologie avec le SIG raster Idrisi. Rapport technique, *Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts*, 75p.
- Ledoux E. (1980) ; Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique ; *Thèse ENSMP-UPMC*.
- Ledoux E., Girard G., Villeneuve J.P. (1984). Proposition d'un modèle couplé pour la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. *La Houille Blanche*, pp101-110.
- Mégny C. (1970). Atlas des nappes aquifères de la région parisienne. *Editions BRGM*.
- Wei H.F. (1990). Modélisation tridimensionnelle du transfert d'eau, de chaleur et de masse dans l'aquifère géothermique du Dogger dans le Bassin de Paris. *Thèse ENSMP*.